

УДК 621.382: 681.586.776

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.; О. В. Осадчук, д. т. н., проф.; С. В. Барабан
ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ IGBT-VJT СТРУКТУРИ
З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

У цій статті проаналізовано сучасний стан розвитку перетворювачів температури на основі піроелектриків. Представлено і описано новий перетворювач температури на основі транзисторної структури з від'ємним опором. Змодельовано вольт-амперну і частотну характеристики представленого пристрою в програмному середовищі Pspice.

Ключові слова: біполярний транзистор з польовим керуванням (БТПК), IGBT, біполярний транзистор, VJT, піроелектрик, перетворювач температури, автогенератор, структура з від'ємним опором, датчик потужності випромінювання (ДПВ), піродетектор.

Вступ

Піроелектричні матеріали знаходять широке застосування в ролі сенсорних пристроїв різного призначення, детекторів і приймачів випромінювань, датчиків теплотричних приладів. Використовується, головним чином, їхня основна властивість – будь-який вид радіації, який потрапляє на піроелектричний зразок, викликає зміну його температури і відповідну зміну поляризації [1].

Основною вхідною дією на піроелектричні перетворювачі є теплова дія, при декількох діях – теплова і механічна, теплова і електрична і т. д. Перелічені дії незалежно від їхньої фізичної природи за характером формування електричного сигналу поділяються на генераторні і параметричні. У зв'язку з цим еквівалентну схему піроелектричного сенсора можна представити у вигляді паралельного (при вимірюванні струму) або послідовного (при вимірюванні напруги) з'єднання конденсатора і генератора (джерела струму або напруги) [2], як показано на рис. 1.

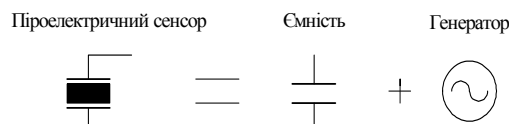


Рис. 1. Еквівалентна схема піроелектричного сенсора

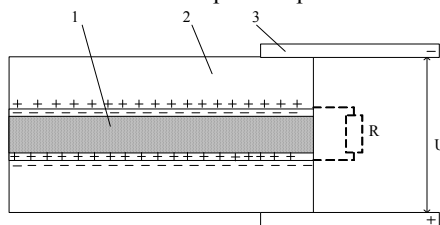


Рис. 2. Ввімкнення піроелектричного перетворювача у зовнішнє коло

У піроелектричному перетворювачі (рис. 2) полярний діелектрик використовується у вигляді пластини 1, покритої металічними електродами 2, до яких під'єднані зовнішні виводи 3. Внаслідок електростатичної індукції в електродах і в зовнішніх виводах потенціал зовнішніх виводів збігається за по знаком з приростом зв'язаного заряду на відповідній стороні піроелектрика. Піроелектрик володіє об'ємною провідністю, яку враховує навантаження витікання R [3].

Теоретичні і експериментальні дослідження

Розглянемо принцип перетворення температури в електричний сигнал. Структурна схема перетворення в термочутливому елементі більшості піроелектричних пристроїв (рис. 3) складається з трьох етапів [4]:

1. $W - \Delta T$: теплова дія W викликає зміну температури ΔT піроелектрика;
2. $\Delta T - \Delta Q$: зміна температури ΔT зумовлює появу зарядів ΔQ на електродах піроелектрика;

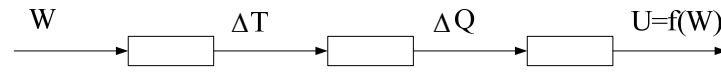


Рис. 3. Структурна схема піроелектричних перетворювачів

3. $\Delta Q - U$: заряд ΔQ на електродах піроелектрика створює різницю потенціалів U , значення якої залежить від власної ємності піроелектрика та імпедансу навантаження.

Піроелектричні сенсори, які становлять кристали піроелектриків з приєднаними виводами, обов'язково потребують схему підсилення вихідного сигналу U . Щоб підсилити піроелектричний сигнал для подальшої обробки, використовують два типи схем підсилення: напруга на навантаженні піроелектрика (рис. 4 а) і підсилення вихідного сигналу піроелектрика за зарядом (рис. 4б) [4, 5].

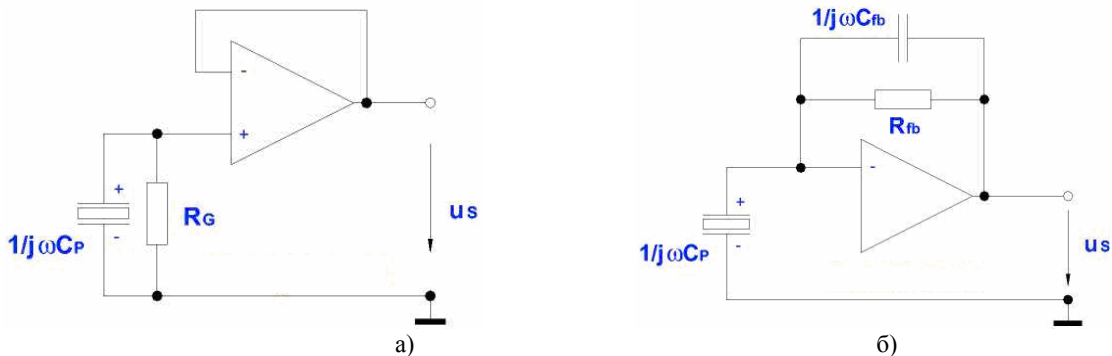


Рис. 4. Схеми попереднього підсилення вихідного сигналу піродетекторів:
а) за напругою; б) за зарядом

У простому випадку підсилювач під'єднаний до витоку польового транзистора. Підзатворний резистор і польовий транзистор інтегровані в корпус сенсора. Резистор у колі витоку польового транзистора розміщений поза корпусом сенсора потужності випромінювання (див. рис. 5). Високий рівень сигналу стосовно шуму як і простота схем є причиною широкого розповсюдження сенсорів [6].

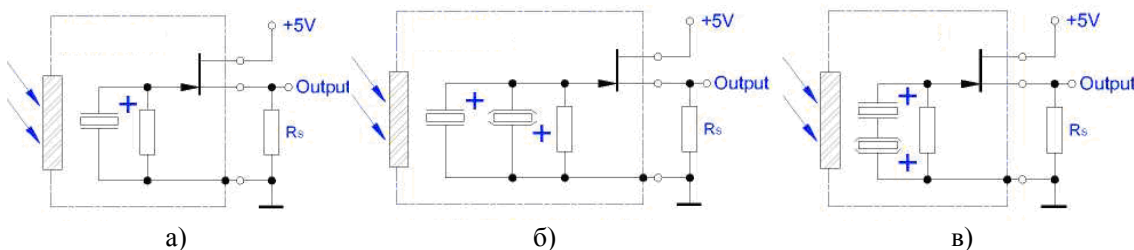


Рис. 5. Базові схеми для підсилення напруги [7]:

- а) з одинарним піродетектором; б) з паралельним поєднанням піродетекторів; в) з послідовним поєднанням піродетекторів

На рис. 6 представлено завершену схему для вимірювання теплової потужності, що містить піроелектричні сенсори потужності випромінювання з підсиленням вихідної

напруги, а також схему обробки вихідного сигналу цих сенсорів [5].

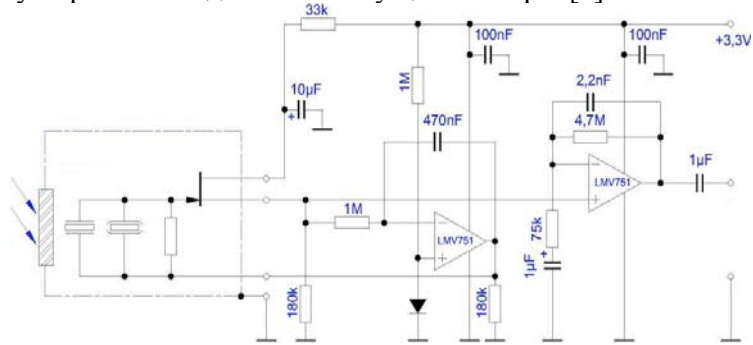


Рис. 6. Схема піроелектричних сенсорів з схемами обробки вихідного сигналу

Як видно з рис. 6, показані пристрої складні за будовою, містять багато електронних компонентів, які впливають на точність вимірювання і вартість вимірювальних пристроїв.

Підсилення за зарядом у схемах з піроелектричними елементами менш популярне, ніж підсилення за напругою. Це пов'язано, в першу чергу, ще з більшою складністю, ніж у схемах за підсилення вихідної напруги, схем обробки вихідного сигналу. На рис. 7 представлені чотири основні схеми з попереднім підсиленням за зарядом вихідного сигналу піроелектричного сенсора [6].

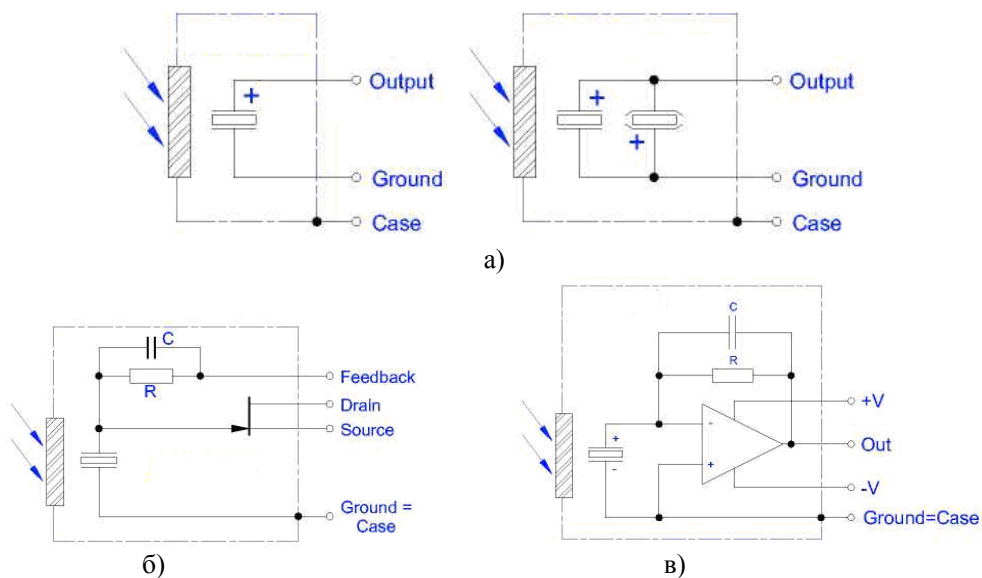


Рис. 7. Піроелектричні детектори з попереднім підсиленням вихідного сигналу за струмом

На рис. 7 а представлені найпростіші піроелектричні детектори, проте в них найнижчий рівень вихідного сигналу стосовно шумів піроелектрика. На рис. 7 б, представлені схеми піродетекторів з від'ємним зворотним зв'язком за зарядом. Схема на основі операційного підсилювача з колом зворотного зв'язку (рис. 7 в) дозволяє регулювати його коефіцієнт підсилення. Як показано в [4], використання операційного підсилювача призводить до значного підсилення чутливості піроелектричного сенсора, яка обмежується умовами теплоізоляції і конструктивними параметрами піроприймача.

Після підсилення піроелектричний сигнал потребує подальшої обробки та перетворення у зручну для аналізу форму. На рис. 8 представлені схеми подальшої обробки вихідного сигналу з попереднім підсиленням струму компанії InfraTec [5].

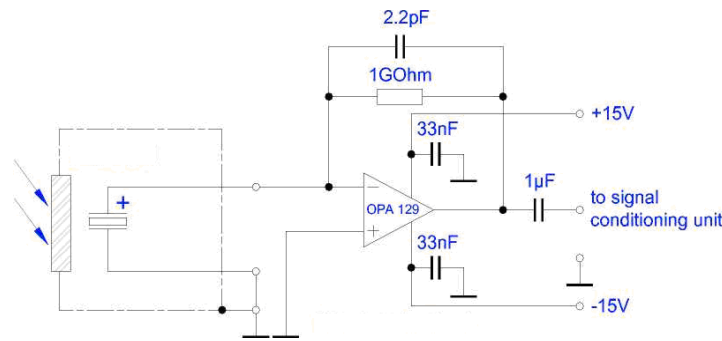


Рис. 8. Схема для підсилення за зарядом піроелектричних детекторів

Розглянувши методи вимірювання температури на основі піроелектриків, поданих у цій статті, можна зробити загальний висновок про складність вимірювання, а якщо проаналізувати більш детально, то отримаємо:

- 1) низька точність вимірювання, яка падає після кожної ланки обробки вихідного сигналу, який вже йде з похибкою, зумовленою особливостями будови піроматеріалів і додатковими “паразитними” фізичними ефектами, окрім піроефекту, тому що кожна схема, чи підсилення, чи обробки, має власну похибку;
- 2) низька економічність пристрою, зумовлена наявністю схем підсилення, АЦП;
- 3) низька завадостійкість;
- 4) неспроможність передачі інформації на відстань.

У [8] знайдено вирішення даних проблем і запропоновано використання перетворювачів температури на основі транзисторних структур з від’ємним опором. Ці пристрої в своїй будові поєднують активні інтегральні конструкції з використанням тонких піроелектричних плівок і автогенераторів на основі транзисторних структур з від’ємним опором. У цій статті проаналізуємо один з таких перетворювачів температури, а також проведемо моделювання його характеристик.

У ролі первинного перетворювача з [9] використаємо біполярний транзистор з польовим керуванням (БТПК або IGBT – insulate gate bipolar transistor) з нанесеними на базу плівкою піроелектрика PbTiO_3 (PTO) і чорненням золотом, який показано на рис. 9.

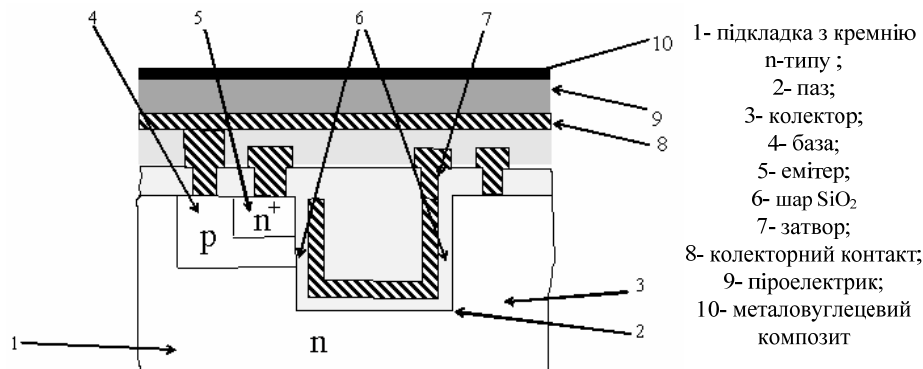


Рис. 9. IGBT структура з плівкою піроелектрика, покритою металовуглецевим композитом, у ланцюзі бази

Цей елемент є датчиком потужності випромінювання (ДПВ) і використовується як сенсор температури в системі автоматизованого керування і контролю параметрів печі ІЧ-сушіння виробів електронної техніки [10]. В основі ДПВ лежить біполярний транзистор з польовим керуванням (IGBT). Розглянемо будову і принцип роботи ДПВ більш детально. Ця IGBT структура містить чутливий елемент (ЧЕ) – поглинач випромінювань, у ролі якого в цьому випадку виступає плівка чорненого золота, керуючий елемент (КЕ) – піроелектричний

перетворювач, в ролі якого в даному випадку виступає нанесена на базу плівка піроелектрика $\text{PbTiO}_3(\text{PTO})$, і виконавчий елемент (ВЕ) – БТПК. Робота ДПВ супроводжується зміною вихідного параметра ВЕ в результаті зміни потенціалу на базі БТПК, яка електрично з'єднана з піроелектриком. Нагрівання піроелектрика відбувається за рахунок перетворення потужності сигналу в теплоту за допомогою ЧЕ [35]. Як видно з рис. 9 [9] вимірювальний первинний перетворювач містить підкладку 1 із кремнію n-типу з орієнтацією (100), на якій виконана ізопланарна транзисторна структура з бічною SiO_2 – ізоляцією, у якій за допомогою анізотропного травлення виконаний паз 2, дно якого розташоване в області колектора 3, а області бази 4 й емітера 5 обмежені однією зі стінок паза. На стінках паза сформований шар SiO_2 – 6 і додатковий польовий електрод – затвор 7. На колекторний контакт 8 послідовно наносяться шари піроелектрика 9 і металовуглицевого композита 10, які здійснюють перетворення потужності сигналу.

Пропонуємо внести даний БТПК у схему з біполярним транзистором для утворення структури з від'ємним опором з метою побудови автогенератора. Схема такого вимірювального пристрою подана на рис. 10.

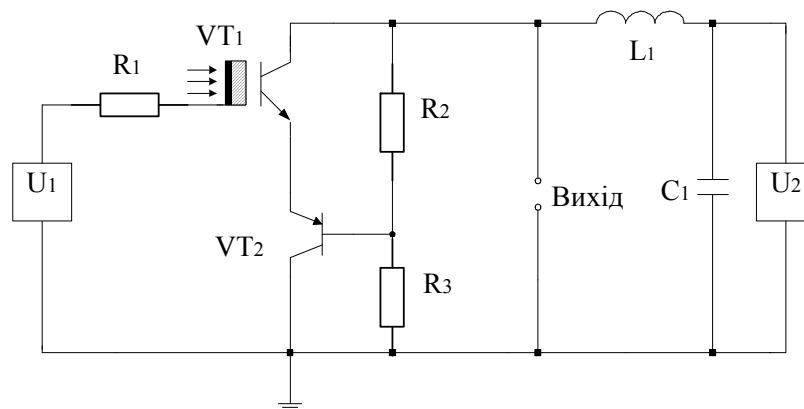


Рис. 10. Перетворювач температури на основі IGBT-BJT структури з від'ємним опором

Як видно з рис. 10, пристрій містить перше джерело напруги U_1 , яке приєднано одним полюсом до затвору IGBT VT_1 з напиленнями на базу плівкою піроелектрика і поглиначем випромінювання, а іншим полюсом – до колектора BJT VT_2 , який під'єднано до заземлення. Емітер IGBT VT_1 з'єднаний з емітером BJT VT_2 , а колектор IGBT VT_1 під'єднано до пасивної індуктивності L_1 , база BJT VT_2 під'єднана між послідовно з'єднаними резисторами R_2 і R_3 , які іншими полюсами паралельно під'єднуються до IGBT-BJT структури, а також паралельно транзисторам VT_1 і VT_2 приєднано пасивну індуктивність L_1 та конденсатор C_1 , і друге джерело напруги U_2 .

Пристрій працює таким чином. У початковий момент часу теплове випромінювання не діє на поглинач випромінювання (ЧЕ, плівка чорного золота). Підвищуємо напругу джерел напруги U_1 і U_2 до величини, коли на електродах колектор–колектор IGBT VT_1 і BJT VT_2 виникає від'ємний опір, який зумовлює виникнення електричних коливань у контурі, утвореному послідовним включенням повного опору з ємнісним характером на електродах колектор–колектор БТПК VT_1 і біполярного транзистора VT_2 , та індуктивного опору пасивної індуктивності L_1 . Конденсатор C_1 запобігає проходженню змінного струму через друге джерело напруги U_2 . При дії теплового випромінювання на БТПК воно поглинається плівкою чорного золота. Поглинуте випромінювання передається на напилену плівку піроелектрика $\text{PbTiO}_3(\text{PTO})$, на базу БТПК. Теплова дія потужності випромінювання W викликає зміну температури $\Delta\theta$ піроелектрика ($W \rightarrow \Delta T$). Зміна температури $\Delta\theta$ зумовлює появу зарядів ΔQ на електродах піроелектрика ($\Delta T \rightarrow \Delta Q$). Заряд ΔQ на електродах піроелектрика створює різницю потенціалів U ($\Delta Q \rightarrow U$), яка додається до напруги, що існує

на електродах база-емітер БТПК VT_1 і змінює значення ємності коливального контуру, утвореного послідовним включенням повного опору з ємнісним характером на електродах колектор-колектор IGBT VT_1 і BJT VT_2 та індуктивним опором пасивної індуктивності L_1 . А це викликає зміну резонансної частоти коливального контуру, яка відображається на вихідному частотному сигналі пристрою.

Проведемо моделювання автогенератора перетворювача температури на основі IGBT-BJT структури з від'ємним опором. Для моделювання цього пристрою скористаємось пакетом програм Orcad Family Release 9.2. У ролі БТПК візьмемо транзистор марки APT25GF100BN, а у ролі біполярного транзистора – BC857A. На рис. 11 представлено вікно програмного середовища Orcad Family Release 9.2 зі схемою досліджуваного пристрою.

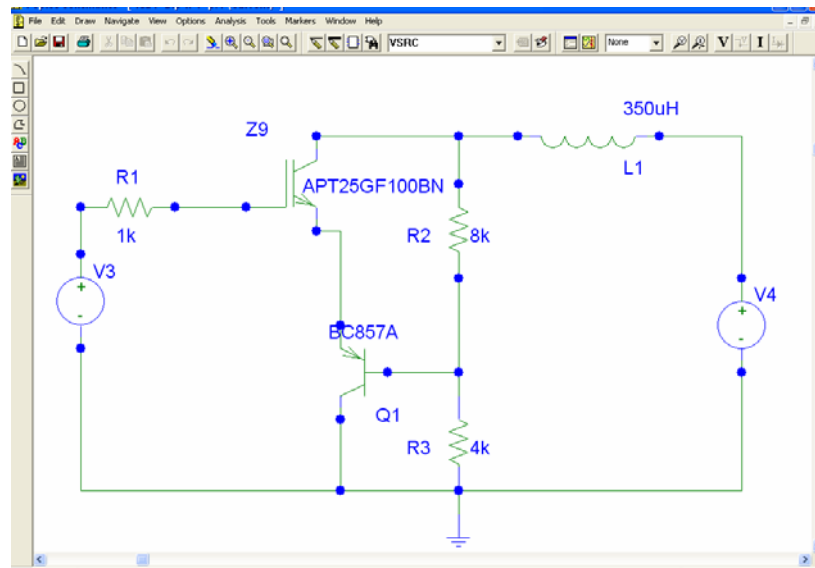


Рис. 11. Схема автогенератора, утвореного на основі з'єднання БТПК і біполярного транзистора

На рис. 12 представлено ряд вольт-амперних характеристик досліджуваного автогенераторного пристрою, отриманих внаслідок моделювання в Orcad Family Release 9.2.

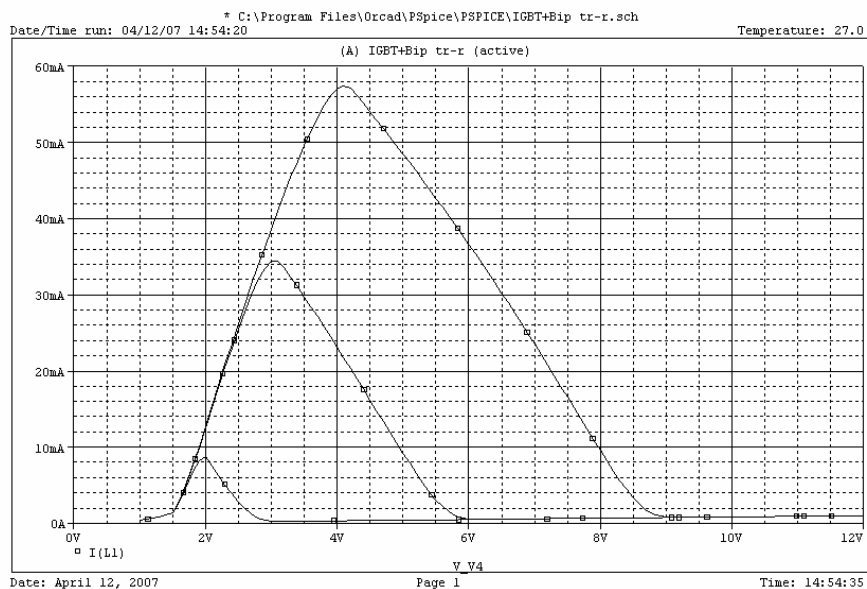


Рис. 12. ВАХ автогенератора при різних значеннях напруги керування

На рис. 13 представлено частотну характеристику автогенератора досліджуваного перетворювача температури, отриману в програмному середовищі PSpice.

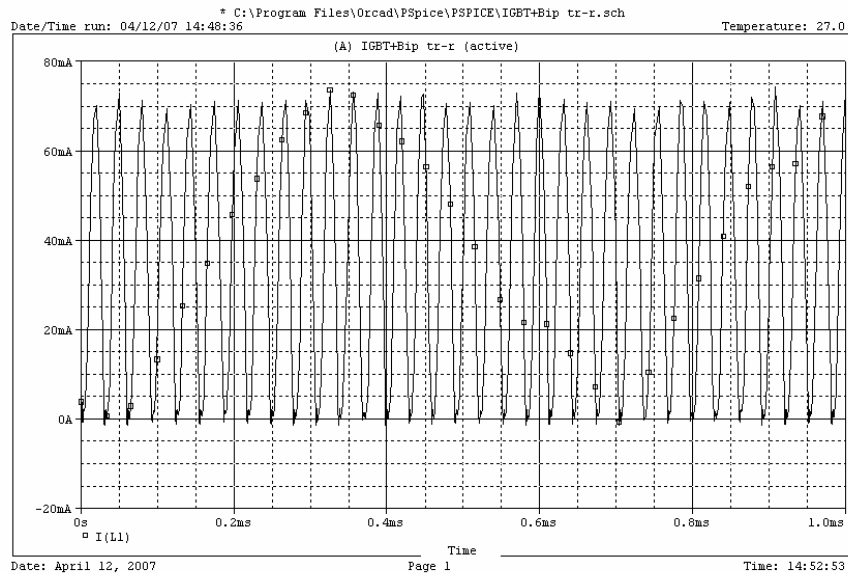


Рис. 13. Частотна характеристика автогенератора, отримана в PSpice

Проаналізуємо отримані результати. Завдяки програмному середовищі PSpice, яке є складовою частиною пакету програм Orcad Family Release 9.2, промодельовано роботу автогенератора перетворювача температури на основі БТПК-біполярної структури з від'ємним опором, внаслідок чого отримано ряд вольт-амперних характеристик і частотну характеристику досліджуваного пристрою. Графіки ВАХ за різних значень напруги керування наведено на рис. 12. Аналіз графіків проведемо за основними ділянками вольт-амперної характеристики. Як видно з рис. 12, на зростаючій ділянці ВАХ всі майже однакові, в деякому проміжку навіть зливаються. Це свідчить про несуттєвий вплив температури на перетворювач у заданому діапазоні напруги (1 - 3 В). Звернемо увагу на піки або переломні ділянки ВАХ. Найбільше відхилення графіків спостерігається саме на цій ділянці. З підвищенням температури пік різко піднімається. Це означає що, температура сильно впливає на значення струму, при якому відбудеться "перелом" і почнеться спадна ділянка, яка відповідає утворенню від'ємного опору в транзисторній структурі. Це найбільш термочутлива ділянка. Спадна ділянка ВАХ становить найбільший інтерес для розробників, оскільки вона визначає діапазон утворення генерації коливач у транзисторній структурі з від'ємним опором. Як видно з рис. 12, задана ділянка достатньо залежна від температури. Якщо розглянути шлях робочої точки, то очевидно, що з підвищенням температури робоча точка лінійно піднімається вгору. Лінійна залежність робочої точки від дії температури і дозволяє використовувати цей перетворювач для вимірювання температури.

Висновки

Проаналізувавши фізичні основи роботи піросенсорів, існуючих методів вимірювання температури на основі піроелектриків, авторами запропоновано новий пристрій для вимірювання температури на основі IGBT-BJT структури з від'ємним опором, а також змодельовано роботу цього пристрою в програмному середовищі PSpice, внаслідок чого отримано ВАХ і частотну характеристику.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Струков Б. А. Пирозлектрические материалы: свойства и применения // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – №5. – С. 96 – 104.
2. Виглеб Т. Датчики. – М.: Мир, 1989. – 196 с.
3. Гаврилова Н. Д. Пирозлектричество / Данилычева М. Н., Новик В. К. – М.: Сов. рад., 1989. – 154 с.
4. Новик В.К. Пирозлектрические преобразователи / Гаврилова Н.Д., Фельдман Н.Б. – М.: Советское радио, 1979. – 176 с.
5. Pyroelectric detectors. Single element detectors. Basic line. – Dresden: Infra Tech GmbH, 1999. – 9 с.
6. Сигов А. С. Сегнетоэлектрические тонкие пленки в микроэлектронике // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №10. – С. 83 – 91.
7. Pyroelectric infrared sensor & sensor module. Catalog № S21E-5. – Tokyo: Murata Manufacturing Co., Ltd., International Division, 2002. – 18 с.
8. Осадчук В. С. Розробка мікроелектронних перетворювачів теплової потужності у частоту на основі транзисторних структур з від'ємним опором / Осадчук О. В., Барабан С. В., Ільченко О. М. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008 – №1. – С. 133 – 139.
9. Кісельов Є. М. Інтегровані датчики потужності випромінювань на основі комбінованих твердотільних структур: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук; спец. 05.27.01 «Твердотільна електроніка»/ Є. М. Кісельов; Нац. тех. ун-т Укр. «КПІ». – Київ, 2006. – 20 с.: 8 іл. – Бібліогр.: С. 17 – 18.
10. Костенко В. Л. Особенности построения корпоративных сетей интеллектуальных датчиков параметров технологических процессов / Швец Е. Я., Максименюк А. В., Киселев Е. Н. / Металлургия (сб. научных трудов) / отв. ред. Колесник Н. Ф., Колобов Г. А. – Запорожье: ЗГИА, 2003. – Выпуск 8. – С. 146 – 148.

Осадчук Володимир Степанович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електроніки, e-mail: osadchuk69@mail.ru

Осадчук Олександр Володимирович – д. т. н., професор, завідувач кафедри радіотехніки, e-mail: osadchuk69@mail.ru

Барабан Сергій Володимирович – аспірант кафедри радіотехніки, e-mail: akakiev1@rambler.ru.
Вінницький національний технічний університет.